

京都大学	博士 (工学)	氏名	劉 奕 宏
論文題目	Analysis of Production Process of Fine Dry Ice Particles and Application for Surface Cleaning (ドライアイス微粒子の形成プロセスの解析と表面洗浄への応用)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、液化二酸化炭素の断熱膨張によるドライアイス粒子の生成、成長、凝集および昇華に伴う状態の変化を明らかにするとともに、ドライアイス噴流の応用例として乾式表面洗浄に着目し、付着微粒子の除去プロセスおよびドライアイス粒子の衝突洗浄効果をまとめたものであり、全6章から構成されている。</p> <p>第1章は序論であり、ドライアイス噴流の特徴と工業的応用例および関連する基礎研究を紹介している。特に、湿式洗浄の代替法として注目されているドライアイス噴流による乾式洗浄は、液化二酸化炭素からドライアイス粒子をジュールトムソン効果によって直接生成でき、洗浄過程で二次汚染や表面損傷などを起こしにくいという利点をもつが、ドライアイス粒子は、成長、凝集および昇華により状態が時間とともに変化するので、<i>in-situ</i> で粒子径、形状、および濃度を測定し、洗浄効果に及ぼす影響因子を把握する必要があることを説明している。</p> <p>第2章では、液化二酸化炭素を断熱膨張させたのち、凝集チャンバーで空間的制限を加えてドライアイス粒子の生成と凝集を効果的に行わせており、高速度カメラによる微視的観察の結果を報告している。また、ドライアイス粒子の逐次凝集過程をチャンバー出口の噴流温度の時間変化と対応させて説明している。チャンバー径を大きくしてドライアイス粒子の移動速度を低下させると凝集粒子径は増大し、凝集形状が不規則になることも明らかにしている。凝集粒子の形成には、噴流中の粒子同士の接触に起因するものと、チャンバー壁における粒子の沈着・再飛散同時現象に起因するものがあるが、後者が支配的であることを説明している。すなわち、ミクロンサイズのドライアイスの一次粒子がチャンバー壁に沈着し、時間とともに沈着層を形成し、沈着層表面から凝集粒子が飛散することを説明している。</p> <p>第3章では、噴流中のドライアイス粒子の粒度分布をレーザー回折・散乱法を用いて <i>in-situ</i> で測定した結果を報告している。膨張ノズルから噴射されたドライアイス粒子は、質量基準中位径が約 $1\ \mu\text{m}$ であり、粒度分布は対数正規で近似できるが、噴射距離を大きくすると二峰性分布に変わることを、粒子の成長、凝集、昇華を用いて説明している。ドライアイス噴流はチャンバーを通過すると、質量基準中位径が約 $100\ \mu\text{m}$ の凝集粒子になり、流速を減少させると凝集粒子径が大きくなるという第2章の観察結果を定量的に示すことに成功している。また、噴流中のドライアイスの粒子径と粒子量の空間分布からドライアイス噴流の有効範囲を明らかにしている。</p> <p>第4章では、第2と3章で得られた知見をもとに、表面に付着した単分散微粒子の除去実験を行い、気流だけでは除去できない付着微粒子をドライアイス粒子の衝突に</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	劉 奕 宏
<p>よって除去できることを定量的に示している。除去率の経時変化において、ミクロンサイズの付着微粒子とサブミクロンサイズの付着微粒子では異なる除去プロファイルを示しており、噴流温度の経時変化と比較した結果、粒子除去に対応する温度分布の中位値は、それぞれ$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$と$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$であることを明らかにしている。$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$では、ドライアイス凝集粒子が多量に形成されており、付着微粒子への衝突によって除去速度が高められることを述べている。また、壁面付着微粒子の除去機構を理論的に検討するため、モーメントモデルを提案し、流体抵抗による粒子の除去効果とドライアイス粒子の衝突による除去効果を分けて解析しており、付着微粒子の大きさがミクロンからサブミクロンに低下すると、ドライアイス粒子の衝突による粒子除去が支配的になることを明らかにしている。</p> <p>第5章では、現実的な付着微粒子の除去プロセスを想定し、多分散微粒子を付着させて、粒子除去率、除去面積、除去頻度を解析している。除去速度が低速から高速へと二段階で変化することを示し、低速領域の除去率は経過時間に対して指数関数で表せることを理論的に述べている。除去率と噴流温度の関係から、$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$以上では粒子除去の主たる機構は気流による流体抵抗であり、除去速度は小さいが、$-70\text{ }^{\circ}\text{C}$以下ではドライアイス粒子の衝突によって除去速度が大きくなることを明らかにしている。ドライアイス粒子の衝突に基づく付着微粒子の除去では、粒子の除去面積と除去頻度を考慮した二酸化炭素単位質量流量当たりの除去速度を評価パラメーターとして提案し、粒子除去システムの最適流量範囲を決定している。</p> <p>第6章は結論であり、本研究により得られた成果、知見を要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、液化二酸化炭素を断熱膨張させて生成したドライアイス粒子の形成プロセスを明らかにするとともに、ドライアイス噴流による表面洗浄への応用として、壁面付着微粒子の除去効果について研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 膨張ノズルで生成したドライアイス噴流をチャンバーで空間的に制限することにより、ドライアイス粒子を効果的に凝集させることができた。凝集状態は温度に依存するが、チャンバー内の粒子の滞留時間は短く、粒子同士の接触に基づく凝集よりもチャンバー壁における粒子の沈着・再飛散同時現象に基づく凝集が支配的であることを明らかにした。

2. 噴流中のドライアイス粒子の粒度分布をレーザー回折・散乱法を用いて in-situ で測定した結果、噴射直後は質量基準中位径が約 $1\ \mu\text{m}$ であり、対数正規分布を示したが、噴射距離を大きくするとドライアイス粒子の成長、凝集、昇華によって二峰性分布に変化することを明らかにした。また、チャンバーを通過したドライアイス粒子は質量基準中位径が約 $100\ \mu\text{m}$ の凝集粒子になるが、凝集粒子径は流速の影響を受けることを確かめ、噴流中のドライアイスの粒子径と粒子量の空間分布からドライアイス噴流の有効範囲を明らかにした。

3. 空気噴流だけでは壁からの除去が難しい単分散微粒子に対して、ドライアイス噴流を適用することにより高い除去率が得られ、ドライアイス粒子の衝突の効果を定量的に示すことができた。また、壁に付着した微粒子の大きさによって粒子除去に求められるドライアイス噴流の温度に違いがあり、温度を下げてドライアイス粒子の凝集を高めると、壁面付着微粒子の除去速度を大きくできることも示した。

4. 壁面付着微粒子の除去機構を理論的に検討するため、モーメントモデルを提案し、流体抵抗による粒子の除去効果とドライアイス粒子の衝突による除去効果を分けて解析した結果、付着微粒子の大きさがミクロンからサブミクロンに低下すると、ドライアイス粒子の衝突による粒子除去が支配的になることを明らかにした。

5. 壁に付着した多分散微粒子を除去するとき、流体抵抗が支配的な領域とドライアイス粒子の衝突が支配的な領域が二段階で現れることを明らかにした。また、粒子の除去面積と除去頻度を考慮した単位質量流量当たりの除去速度を評価パラメーターとして、粒子除去システムの操作条件を決める方法を提案した。

以上、本論文はドライアイス微粒子の形成プロセスの解明と表面洗浄への応用において基礎的知見を与えるものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 2 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。